

POUR COMPTER
PRIX 10 fr.



ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES



241

EXPOSÉS D'ASTRONOMIE STELLAIRE

Publiés sous la direction de

M. HENRI MINEUR

Astronome à l'Observatoire de Paris

"CURRENT SCIENCE"
RECEIVED.

3-8-35

V

LES SPECTRES

DES

NEBULEUSES GAZEUSES

PAR

P. SWINGS

Chargé de Cours à l'Université de Liège



PARIS

HERMANN & C^{IE}, ÉDITEURS

6, Rue de la Sorbonne, 6

—
1935





ACTUALITES SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

PUBLIÉES SOUS LA DIRECTION DE MM.

René AUDUBERT
Directeur de Laboratoire à l'Ecole
des Hautes Etudes
ÉLECTROCHIMIE THÉORIQUE

J.-P. BECQUEREL
Professeur au Muséum d'Histoire Naturelle
**OPTIQUE ET MAGNÉTISME
AUX TRÈS BASSES TEMPÉRATURES**

G. BERTRAND
Membre de l'Institut
Professeur à l'Institut Pasteur
CHIMIE BIOLOGIQUE

L. BLARINGHEM
Membre de l'Institut
Professeur à la Sorbonne
BIOLOGIE VÉGÉTALE

Georges BOHN
Professeur à la Faculté des Sciences
ZOOLOGIE

J. BORDET
Prix Nobel
Directeur de l'Institut Pasteur de Bruxelles
MICROBIOLOGIE

J. BOSLER
Directeur de l'Observatoire de Marseille
ASTROPHYSIQUE

Léon BRILLOUIN
Professeur au Collège de France
THÉORIE DES QUANTA

Louis de BROGLIE
Membre de l'Institut
Professeur à la Sorbonne
Prix Nobel de Physique
**I. PHYSIQUE THÉORIQUE
II. PHILOSOPHIE DES SCIENCES**

Maurice de BROGLIE
de l'Académie Française
et de l'Académie des Sciences
**PHYSIQUE ATOMIQUE
EXPÉRIMENTALE**

D. CABRERA
Directeur de l'Institut de Physique et Chimie
de Madrid
**EXPOSÉS SUR LA THÉORIE
DE LA MATIÈRE**

E. CARTAN
Membre de l'Institut
Professeur à la Sorbonne
GÉOMÉTRIE

M. CAULLERY
Membre de l'Institut
Professeur à la Faculté des Sciences
BIOLOGIE GÉNÉRALE

L. CAYEUX
Membre de l'Institut
Professeur au Collège de France
**GÉOLOGIE
ROCHES SÉDIMENTAIRES**

A. COTTON
Membre de l'Institut
Professeur à la Sorbonne
MAGNÉTO-OPTIQUE

M^{me} Pierre CURIE
Professeur à la Sorbonne
Prix Nobel de Physique
Prix Nobel de Chimie
**RADIOACTIVITÉ
ET PHYSIQUE NUCLÉAIRE**

Véra DANTCHAKOFF
Ancien professeur à l'Université Columbia
(New-York)
Organisateur de l'Institut
de Morphogénèse Expérimentale
(Moscou Ostankino)
**LA CELLULE GERMINALE DANS
L'ONTOGÉNÈSE ET L'ÉVOLUTION**

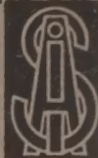
E. DARMOIS
Professeur à la Sorbonne
CHIMIE-PHYSIQUE

K. K. DARROW
Bell Telephone Laboratories
CONDUCTIBILITÉ DANS LES GAZ

Arnaud DENJOY
Professeur à la Sorbonne
**THÉORIE DES FONCTIONS
DE VARIABLE RÉELLE**

J. DUESBERG
Recteur de l'Université de Liège
**BIOLOGIE GÉNÉRALE
EN RAPPORT AVEC LA CYTOLOGIE**

CATALOGUE SPÉCIAL SUR DEMANDE



B. S. Mohan Rao

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

241

EXPOSÉS D'ASTRONOMIE STELLAIRE

Publiés sous la direction de

M. HENRI MINEUR

Astronome à l'Observatoire de Paris

V

LES SPECTRES

DES

NEBULEUSES GAZEUSES

PAR

P. SWINGS

Chargé de Cours à l'Université de Liège



PARIS

HERMANN & C^{IE}, ÉDITEURS

6, Rue de la Sorbonne, 6

—
1935

*Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation
réservés pour tous pays.
Copyright 1935 by Librairie Scientifique Hermann et C^{ie},
Paris.*



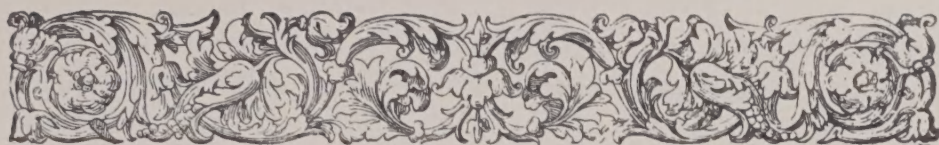
Introduction

LA spectroscopie des nébuleuses gazeuses constitue un des domaines de l'Astrophysique ayant fait les progrès les plus considérables durant ces quelques dernières années. Il n'y a guère, en Astrophysique, de domaine où les travaux les plus modernes de Physique expérimentale et théorique aient conduit à des résultats aussi fondamentaux. Le présent fascicule a pour but d'indiquer aux lecteurs de langue française l'état actuel du problème. Nous n'avons pas essayé d'exposer dans le détail les nombreux travaux faits dans cette direction : nous avons préféré donner une mise au point la plus sommaire possible.

Le spectre d'une nébuleuse gazeuse est caractérisé par la présence de raies brillantes dues à une émission atomique. On est bien habitué depuis les observations de Slipher, Wright, Curtiss et surtout de Hubble ⁽¹⁾ à considérer que la nébuleuse ne tire pas son rayonnement directement d'elle-même ; son émission lumineuse est due à l'énergie reçue d'une étoile voisine *, que nous appellerons dans la suite « étoile centrale ». On a affaire à une espèce de fluorescence assez complexe, dont la première théorie a été suggérée par D. H. Menzel ⁽²⁾ et développée quantitativement d'abord par H. Zanstra ⁽³⁾, puis par Ambarzumian ⁽⁴⁾ et par S. Chandrasekhar ⁽⁵⁾. L'idée fondamentale de cette théorie consiste en ceci : un atome E de la nébuleuse s'ionise lorsqu'il absorbe un photon venant de l'étoile centrale et ayant une éner-

* Cette idée avait déjà été émise par Sir William Herschel en 1791.

*Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation
réservés pour tous pays.
Copyright 1935 by Librairie Scientifique Hermann et C^{ie},
Paris.*



Introduction

LA spectroscopie des nébuleuses gazeuses constitue un des domaines de l'Astrophysique ayant fait les progrès les plus considérables durant ces quelques dernières années. Il n'y a guère, en Astrophysique, de domaine où les travaux les plus modernes de Physique expérimentale et théorique aient conduit à des résultats aussi fondamentaux. Le présent fascicule a pour but d'indiquer aux lecteurs de langue française l'état actuel du problème. Nous n'avons pas essayé d'exposer dans le détail les nombreux travaux faits dans cette direction : nous avons préféré donner une mise au point la plus sommaire possible.

Le spectre d'une nébuleuse gazeuse est caractérisé par la présence de raies brillantes dues à une émission atomique. On est bien habitué depuis les observations de Slipher, Wright, Curtiss et surtout de Hubble ⁽¹⁾ à considérer que la nébuleuse ne tire pas son rayonnement directement d'elle-même ; son émission lumineuse est due à l'énergie reçue d'une étoile voisine *, que nous appellerons dans la suite « étoile centrale ». On a affaire à une espèce de fluorescence assez complexe, dont la première théorie a été suggérée par D. H. Menzel ⁽²⁾ et développée quantitativement d'abord par H. Zanstra ⁽³⁾, puis par Ambarzumian ⁽⁴⁾ et par S. Chandrasekhar ⁽⁵⁾. L'idée fondamentale de cette théorie consiste en ceci : un atome E de la nébuleuse s'ionise lorsqu'il absorbe un photon venant de l'étoile centrale et ayant une éner-

* Cette idée avait déjà été émise par Sir William Herschel en 1791.

gie $h\nu$ supérieure au potentiel d'ionisation de E^* . Un ion E^+ ainsi produit pourra se combiner avec un électron qu'il aura capturé ; en passant des orbites extérieures de l'atome E vers les niveaux inférieurs, l'électron donnera lieu à l'émission des raies de E . Ce processus a été développé théoriquement et a notamment permis de déterminer les températures des étoiles centrales ; on a trouvé des nombres élevés, supérieurs à 30.000° . Ce mécanisme est très important non seulement pour l'étude des nébuleuses, mais encore dans plusieurs autres domaines (novae, étoiles du type P Cygni, étoiles de Wolf Rayet, étoiles Be, ...).

On ne peut toutefois interpréter ainsi, dans les spectres de nébuleuses, que les raies permises de H, HeI et HeII. D'autres phénomènes se présentent que nous aurons l'occasion d'exposer plus loin.

§ 1. Etat de la question

Les principales données d'observation relatives aux spectres de nébuleuses sont dues à W. H. Wright et résultent de longues observations faites à l'Observatoire Lick. Dans son important mémoire de 1918 (*), Wright ne se contente pas de donner les descriptions des spectres de nombreuses nébuleuses dans tout le domaine accessible à son spectrographe en quartz, associé au télescope (alors argenté) du Lick Observatory (c'est-à-dire de λ 3.300 à λ 6.700) ; il montre déjà que certaines raies constituent des « paires » qui ont vraisemblablement une origine commune ; il fait une première discussion des états d'excitation des différents astres. De nombreuses raies étaient dues aux transitions permises de H, He I et He II ; mais il restait environ 50 % des lignes spectrales qui n'avaient à ce moment aucune possibilité d'identification et parmi elles se trouvaient des raies très intenses, notamment $\lambda\lambda$ 4.959 et 5.007. On attribuait ces longueurs d'onde à un élément hypothétique, le « nébulium »,... pour lequel il n'y avait malheureusement aucune place libre dans le tableau périodique des éléments. Nous ne nous attarderons pas aux travaux publiés au sujet de cet élément hypothétique.

* C'est-à-dire une longueur d'onde λ inférieure à la limite des séries d'absorption partant du niveau fondamental de l'atome E ; pour H, il faudra $\lambda < 912 \text{ \AA}$; pour He, $\lambda < 504 \text{ \AA}$; pour He^+ , $\lambda < 228 \text{ \AA}$.

C'est seulement en 1928 que la question fit son premier progrès important : il était dû à I. S. Bowen (⁷) qui montra que plusieurs raies nébulaires provenaient de transitions interdites à partir d'états métastables de N II, O II et O III ; notamment les deux raies intenses $\lambda\lambda$ 5.007 et 4.959 sont dues aux transitions interdites $^3P_{1,2} - ^1D_2$ de l'ion O III. Peu après (⁸), F. Becker et W. Grotrian identifiaient aussi une autre raie comme étant due à N II ; puis Bowen trouvait dans les nébuleuses des raies interdites de S II (⁹), puis de O I (¹⁰) (en même temps que F. Paschen (¹¹)).

En 1933 et 1934 *, à la suite des recherches de Boyce-Menzel-Payne (¹²), de Bowen (¹³) et de Edlén-Swings (¹⁴) — recherches basées sur les travaux de spectroscopie pure de Bowen, Edlén, Fowler, Hopfield, Gilles, etc. — les raies interdites de Ne III, Ne IV et Ne V étaient identifiées avec certitude, celles de Argon IV semblaient probables et les autres atomes étaient discutés.

Egalement en 1934, un beau mémoire théorique de E. U. Condon (¹⁵) venait apporter des précisions relativement aux probabilités des transitions interdites.

D'ailleurs, les observations progressaient également. En 1928, Merrill mesurait plusieurs raies dans le rouge extrême (¹⁶) ; en 1934 d'autres raies nouvelles étaient observées par R. H. Stoy (¹⁷), qui donnait aussi quelques tentatives d'identifications ; le grand progrès pourtant allait être réalisé par Wright (¹⁸) en utilisant le télescope récemment aluminisé du Lick Observatory ; grâce au pouvoir réflecteur élevé de l'aluminium pour l'ultra violet astronomique, Wright put déceler des raies de $\lambda < 3.300 \text{ \AA}$, qu'il attribua à des transitions permises de O III ; d'autres raies nébulaires coïncidaient avec certaines raies permises de N III. La plupart des raies de O III et N III observées en laboratoire n'apparaissaient d'ailleurs pas.

On se trouvait donc devant un nouveau « puzzle » : à quoi est due cette sélectivité dans l'apparition des raies de O III et N III ?

C'est de nouveau à I. S. Bowen (¹⁹) qu'on doit l'explication de cette énigme. La sélectivité à interpréter est due à un mécanisme de fluorescence que nous développerons au § 2.

* Remarquons que, de 1928 à 1934, de nombreuses raies interdites — notamment de Fe II — avaient été trouvées en émission par Merrill dans certaines étoiles, par exemple dans η Carinae.

Enfin dans le numéro de janvier 1935 de l'*Astrophysical Journal* (²⁰), Bowen donne une magnifique synthèse des idées qu'on peut actuellement se faire au sujet des spectres des nébuleuses gazeuses.

A l'heure actuelle, presque toutes les raies des nébuleuses ont reçu une interprétation. Nous avons groupé dans le tableau I * toutes les raies observées, en indiquant leur intensité dans deux nébuleuses typiques N G C 7027 et N G C 6572. Les colonnes 4, 5, 6 donnent les interprétations proposées. Il ne reste que relativement peu de raies à identification douteuse ou encore non interprétées ; toutes sont très faibles et n'apparaissent que dans quelques rares nébuleuses. Les raies observées sont tirées des mémoires de Wright, de Merrill et de Stoy ; les identifications sont celles de Wright, Bowen, Becker-Grotrian, Boyce-Menzel-Payne, Edlén-Swings et Stoy.

Afin d'alléger l'exposé, nous avons reporté dans l'Appendice I les renseignements relatifs aux types de transitions interdites et aux précautions à prendre pour les identifications.

§ 2. L'émission des raies permises

L'examen du tableau I montre que les nébuleuses manifestent comme raies permises :

- a) Les spectres de H, He I et He II ;
- b) Quelques multiplets sélectionnés de O III et N III ;
- c) Quelques raies faibles qu'on suggère provisoirement comme pouvant, peut-être, provenir de C II, C III, O II et Ca II.

Nous avons indiqué, dans l'introduction, le phénomène primaire donnant lieu à l'émission de raies. A ce mécanisme, viennent s'en superposer plusieurs autres donnant également lieu à des raies permises par les règles de sélection ; c'est ce que nous résumerons dans ce paragraphe, réservant pour le suivant, le processus produisant les raies interdites ; les mécanismes exposés ici ont été découverts et remarquablement mis en lumière par I. S. Bowen.

Nous prendrons avec Bowen, l'exemple de l'ion He II. Après absorption d'un photon $\lambda < 228 \text{ \AA}$ venant de l'étoile centrale,

* On trouvera ce tableau à la page 17.

He II est ionisé et devient He^{++} . Après quelque temps, l'ion He^{++} va capturer un électron sur l'une de ses orbites extérieures ; les transitions de l'électron entre les orbites extérieures donne lieu à l'émission des raies de He II du domaine observable ; petit à petit, l'électron va se rapprocher du niveau normal $1s\ ^2\text{S}$ où il arrivera après émission de l'une des raies de la série principale : $\lambda\lambda\ 304$ (raie de résonance) ou 256, ou 243, ... Ces quanta de l'ultra-violet lointain agissent de différentes façons :

a) Ils peuvent ioniser H ou He I [puisque leur longueur d'onde est inférieure à 912 Å (H) ou 504 Å (He)] et par conséquent produire l'émission du spectre de H et de He I lorsque les ions H^+ ou He^+ se combinent à un électron ; remarquons d'ailleurs que l'atome He, en émettant ses raies ultra-violettes, peut lui même ioniser un atome H ;

b) Les raies $\lambda\lambda\ 304, 256, 243...$ ont pour niveau final, l'état électronique normal $1s\ ^2\text{S}_{1/2}$ de He II ; elles peuvent donc être absorbées par d'autres atomes He II. Si la raie de résonance $\lambda\ 304$ est absorbée, elle portera l'atome au premier niveau excité $2p\ ^2\text{P}^0$ et il y aura, ensuite, simplement réémission de $\lambda\ 304$. Si $\lambda\ 256$ ou 243 ou etc... est absorbée, l'atome est porté à un état excité $3p\ ^2\text{P}^0$ ou $4p\ ^2\text{P}^0$,... à partir duquel il pourra, soit retomber directement au niveau normal $1s\ ^2\text{S}$ en émettant $\lambda\ 256$ ou 243 ou, soit * passer par le niveau intermédiaire $2p\ ^2\text{P}^0$ pour, de là, finalement tomber à l'état fondamental en émettant $\lambda\ 304$. — On comprend, d'après ce mécanisme, que, après quelque temps, les quanta ultra-violets lointains absorbés par les atomes He II sont transformés en quanta $\lambda\ 304$ et en raies de He II de plus grande longueur d'onde qui, elles, peuvent aisément s'échapper de la nébuleuse et nous parvenir, puisqu'elles ne sont pas absorbées par des atomes He II à l'état électronique normal ⁽²¹⁾ ;

c) Par suite d'une coïncidence fortuite, la raie $\lambda\ 303,790\text{ Å}$ de He II agit fortement sur l'atome O III. Celui-ci présente en effet une raie d'absorption

$$2s^2\ 2p^2\ ^3\text{P}_2 - 2s^2\ 2p\ 3d\ ^3\text{P}^0_2$$

de longueur d'onde $\lambda\ 303,799\text{ Å}$; la différence 0,019 Å entre les longueurs d'onde de He II et de O III peut être compensée par

* Les niveaux $3p^2\text{P}^0$, $3s^2\text{S}$, $3d^2\text{D}$,... sont en effet extrêmement voisins.

l'effet Doppler-Fizeau résultant des mouvements internes de la nébuleuse, de sorte que la raie de résonance λ 304 émise par He II peut être absorbée par un atome O III qui sera ainsi porté de son état normal $2 p^2 {}^3P_2$ à l'état excité $2 p 3 d {}^3P^0_2$. De ce niveau excité, l'atome O III peut, soit retomber au niveau normal en réémettant λ 304 (et alors le processus recommence), soit passer par les niveaux intermédiaires que permettent les règles de sélection. Dans ce second cas, on a donc les transitions successives :

$$\begin{aligned} 2 p 3 d {}^3P^0_2 &\rightarrow 2 p 3 p ({}^3P, {}^3S, {}^3D) : \text{raies } 3.133, 3.429, 3.444 ; \\ 2 p 3 p ({}^3P, {}^3S, {}^3D) &\rightarrow 2 p 3 s {}^3P^0 : \text{raies } 3.025, 3.047, 3.299, \\ &3.312, 3.341, 3.759 ; \\ 2 p 3 s {}^3P^0 &\rightarrow 2 p^2 {}^3P_2 : \text{raie } 374, 436 \text{ \AA}. \end{aligned}$$

En particulier, on arrive donc à l'émission fréquente de la raie λ 374, 436 Å ; celle-ci peut être réabsorbée par un autre atome O III, qui la réémettra, ce qui ne change rien ;

d) Mais une autre coïncidence se présente. L'atome N III possède une raie d'absorption

$$2 s^2 2 p {}^2P^0_{\frac{3}{2}} \rightarrow 2 s^2 3 d {}^2D_{\frac{5}{2}}$$

de longueur d'onde λ 374, 434 Å. La raie λ 374, 436 de O III pourra donc être absorbée par un atome N III qu'elle portera à l'état excité $3 d {}^2D_{\frac{5}{2}}$; d'où, par chutes successives vers le niveau fondamental $2 p {}^2P^0_{\frac{3}{2}}$, émission de certaines raies de N III conformes aux règles de sélection :

$$\begin{aligned} 3 d {}^2D &\rightarrow 3 p {}^2P^0 ; \\ \text{puis } 3 p {}^2P^0 &\rightarrow 3 s {}^2S ; \\ \text{puis enfin } 3 s {}^2S &\rightarrow 2 p {}^2P^0 ; \end{aligned}$$

e) Dans le cas de O III, l'interprétation fournie explique toutes les raies observées, sauf la raie λ 3.118 qui apparaît très faiblement dans les nébuleuses, cette raie résulte du passage

$$2 p 3 d {}^3P^0_1 \rightarrow 2 p 3 p {}^3S_1.$$

Elle est excitée par un mécanisme analogue. L'atome O III a aussi une raie d'absorption λ 303, 693 dont le niveau supérieur est précisément $2 p 3 d {}^3P^0_1$; une vitesse relative de 90 km/sec. suffit (par effet Doppler-Fizeau) pour que l'atome O III puisse être après absorption de la raie de He II, porté à l'état $2 p 3 d {}^3P^0_1$, à

partir duquel il émettra λ 3.118 en tombant au niveau $2p\ 3p\ ^3S_1$. Aucune autre raie de O III — fût-elle même beaucoup plus intense en laboratoire — n'est observée ;

f) Un fait analogue se présente pour N III qui présente, outre la raie λ 374, 434 Å une autre raie d'absorption λ 374, 442 également très voisine de λ 374, 436 de O III. Ceci permet d'ailleurs d'interpréter aisément certaines différences observées pour les intensités relatives, entre les raies nébulaires et les raies de laboratoire.

Remarques importantes

1. Il faut naturellement essayer de doser l'importance des différents mécanismes exposés plus haut. Remarquons d'abord que le mécanisme d'ionisation d'un atome E par absorption d'un photon de longueur d'onde inférieure à celle requise par le potentiel d'ionisation de E, présente, en général, une probabilité beaucoup moins grande que le mécanisme d'excitation par absorption d'un photon de longueur d'onde égale à celle d'une raie d'absorption. Le mécanisme de fluorescence est, de ce fait, amené à jouer un rôle important.

Les dimensions des nébuleuses sont du même ordre de grandeur que le chemin moyen que peut parcourir un photon avant que l'absorption avec ionisation se produise. En revanche, les atomes abondants He II ont une très grande possibilité d'absorption pour les photons dont les longueurs d'onde coïncident avec leurs raies d'absorption λ 304, 256, etc... Å. Ces quanta 304, 256, ... Å ne peuvent donc s'échapper que très difficilement de la nébuleuse, après maintes absorptions et réémissions. Il en résulte bien que la fluorescence de O III et N III due à λ 304 a l'occasion de jouer un rôle important.

2. Toujours pour la même raison, la majorité des quanta λ 304 servent à exciter les atomes O III (d'où excitation subséquente des atomes N III), plutôt qu'à ioniser H ou He I. Il en résulte que les intensités des raies permises de O III et N III sont proportionnelles au taux de formation de λ 304 Å, mais sont plutôt indépendantes des abondances en O III et N III.

3. A l'appui de cette remarque, signalons le fait d'observa-

tion suivant : les images monochromatiques des nébuleuses pour les longueurs d'onde de O III et N III (obtenues au prisme-objectif) sont de dimensions analogues à celles des longueurs d'onde de He II, mais différent fortement des dimensions des images des raies interdites de O III.

4. Bowen donne une explication possible de l'intensité anormalement élevée de la raie λ 4.686

$$(3 s^2S, 3 p^2P^0, 3 d^2D - 4 s^2S, 4 p^2P^0, 4 d^2D, 4 f^2F^0)$$

de He II dans les nébuleuses. Par suite de la grande intensité du photon λ 304, un grand nombre d'atomes He II seraient amenés à l'état $2 s^2S$, qui est probablement métastable. De là, les atomes de He II peuvent être amenés à l'état $4 p^2P^0$ par absorption de la raie de résonance extrêmement intense λ 1.216 de H. Une vitesse relative de 120 km/sec. (entre les atomes H et He II) suffirait pour combler la légère différence de longueurs d'onde et, étant donné la masse légère des atomes H et He II, de telles vitesses relatives doivent être assez fréquentes.

5. Cas des raies λ 3.935, 4.416, 4.267 et 4.650. — Ce sont, en dehors des raies de II, He I, He II, O III et N III, les seules longueurs d'onde qui pourraient peut-être provenir de transitions permises, mais les identifications restent encore extrêmement douteuses ; ces quatre raies sont très faibles ou même seulement suspectées et ne s'observent que dans quelques rares nébuleuses. Nous croyons plutôt qu'on sera amené à ne pas maintenir les identifications tentées.

§ 3. L'émission des raies interdites

En dehors des raies permises de H, He I, He II, O III et N III, les nébuleuses présentent les raies interdites d'une série d'atomes : N II, O I, O II, etc... dont, d'autre part, le spectre « permis » ne se présente pas. Cette émission de N II, O I, etc... ne peut donc pas résulter de la recombinaison d'ions avec des électrons capturés ; il faut, pour l'interpréter, invoquer un autre mécanisme.

L'explication est la suivante. Un des atomes le plus abondants (H, He I et He II), après absorption d'un quantum suffisamment grand (venant de l'étoile centrale ou d'ionisations préa-

lables), s'ionise et expulse un électron avec une vitesse qui peut être très grande *.

Comme les potentiels d'excitation inférieurs de H, He I et He II sont respectivement 10,2 ; 19,7 et 40,6 électron-volts, les électrons expulsés d'énergie inférieure à 10,2 électron-volts ne peuvent intéresser en rien les éléments abondants H, He I et He II. En revanche, par choc avec des atomes à potentiels d'excitation assez bas, ils peuvent activer ceux-ci. En particulier, les atomes à configuration électronique normale permettant des états métastables ont des potentiels d'excitation moindres que 10 électron-volts (pour les raies observées, les potentiels sont compris entre 1,8 et 5,3 électron-volts). Il y aura donc une probabilité appréciable pour que, par chocs électroniques, ces états métastables soient occupés.

Pourquoi les transitions interdites, partant de ces niveaux métastables, s'observent-elles dans les nébuleuses et pas en laboratoire ? L'atome, dans l'état métastable, n'émet une de ses raies « interdites » en passant à un état inférieur, que si sa transition est spontanée, c'est-à-dire s'il a eu le temps de vivre, dans l'état excité supérieur, toute sa « vie » de niveau métastable, cette vie étant très longue par rapport aux états excités ordinaires. Ceci n'est pas possible en laboratoire où, même dans le cas des vides les plus élevés qu'on puisse réaliser, les intervalles moyens entre deux chocs sont beaucoup plus courts que la vie normale d'un état métastable et où, par conséquent, le retour de l'atome au niveau normal se fait par choc de seconde espèce sans émission de lumière. C'est au contraire possible dans les nébuleuses à cause des densités extrêmement faibles qui y règnent **.

On trouve dans le tableau I l'état actuel des identifications basées sur les raies interdites. Les raies interdites $\lambda\lambda$ 4.959 et 5.007 de O III sont, de loin, les raies les plus intenses des spectres

* L'énergie de l'électron expulsé est égale à la différence entre l'énergie du quantum incident et le potentiel d'ionisation.

** Il faut encore — ce qui est le cas pour les nébuleuses — que l'atome dans l'état métastable ne soit pas soumis à un rayonnement intense, car sinon, par absorption, il passera (par transition permise) à un niveau supérieur à partir duquel il émettra des raies permises (condition d'Eddington).

Remarquons que les raies interdites, émises par un atome A déterminé, ne peuvent pas être « réabsorbées » par les autres atomes A de la nébuleuse.

de nébuleuses. Dans son mémoire de janvier 1935, Bowen indique toutes les raies interdites des configurations $2p^2$, $2p^3$, $2p^4$; $3p^2$, $3p^3$, $3p^4$; les seuls atomes manifestant leur présence avec certitude sont l'oxygène, l'azote, le néon et le soufre; l'argon ne peut pas encore être considéré comme absolument certain; les autres éléments auxquels on pouvait s'attendre F, Na, Si, P, Cl, K, Ca sont, soit extrêmement douteux, soit décidément absents; on ne peut rien dire du carbone, du magnésium et de l'aluminium.

Pour les éléments plus lourds que Ca et qui sont généralement assez abondants dans les astres, on ne peut souvent pas, par manque de données spectroscopiques, calculer les transitions interdites; pour certains éléments d'ailleurs (au moins pour les premières ionisations), les niveaux métastables sont proches de niveaux excités ordinaires, de sorte que le fait qu'on n'observe aucune de leurs raies permises indique leur absence ou tout au moins leur rareté (Bowen). Nous ajoutons quelques mots à ce sujet dans l'appendice 2.

§ 4. Conclusions

Quels sont donc, en résumé, les phénomènes physiques dominant lieu, au sein des nébuleuses, à l'émission des raies que nous observons ?

Il y a lieu de considérer les points suivants :

1° Le mécanisme primaire consiste en ce que les longueurs d'onde ultra-violettes de l'étoile centrale ionisent les éléments abondants H, He et He^+ de la nébuleuse; par recombinaison avec des électrons, les ions H^+ , He^+ et He^{++} donnent lieu à l'émission des spectres complets de H, He et He^+ ;

2° Les raies de l'ultra-violet lointain émises par He (ou He^+) peuvent ioniser H (ou H et He);

3° Les raies de l'ultra-violet lointain émises par He^+ peuvent exciter d'autres atomes He^+ ; de plus la raie de résonance de He II peut encore — à cause de la coïncidence des longueurs d'onde de la raie de résonance de He II et d'une raie d'absorption de O III — porter les atomes O III à un niveau excité déterminé. Ces atomes, en émettant les raies qui leur sont permises à partir de l'état excité où ils ont été amenés, finissent par fournir une raie intense qui, précisément, coïncide en longueur d'onde avec une raie d'absorption de N III. D'où une fluorescence analogue de l'atome N III;

4° Les électrons expulsés des atomes H, He ou He^+ après ionisation de ceux-ci, peuvent exciter certains atomes (N II, O I, O II, O III, Ne III, Ne IV, Ne V, S II, A IV ?, ...) et les porter à des états métastables, à partir desquels — à cause des faibles densités régnant dans les nébuleuses — ces atomes émettent leurs raies interdites.

Peut-on, de cette analyse, tirer quelque conclusion relativement à la composition chimique des nébuleuses ?

En général, la forte intensité des raies d'un élément, dans un spectre stellaire, constitue un critère d'abondance. Mais dans le cas des raies d'émission observées dans les nébuleuses, la diversité des mécanismes donnant naissance aux différentes raies exige que l'on prenne des précautions pour parler des abondances. On peut comparer les abondances des éléments H, He I et He II qui donnent leurs spectres complets ; on peut aussi comparer entre eux les atomes qui se manifestent par leurs raies interdites ; établir le pont entre les deux groupes d'éléments est impossible encore à l'heure actuelle, mais constituerait une recherche du plus haut intérêt.

Pour ce qui concerne les raies de fluorescence de O III et N III, leur intensité dépend surtout du taux de formation des quanta λ 304 de He II et est, par suite, plutôt indépendante des abondances en O III et N III. Leur grande intensité provient de ce qu'elles peuvent profiter de grandes sources d'énergie, ce qui n'est pas le cas pour H et He.

Si on compare H, He I et He II, on constate d'après l'intensité très grande des raies de la série de Balmer, que l'hydrogène est, de loin, l'élément le plus abondant des nébuleuses ; l'hélium vient ensuite. Comme aucune autre raie permise ne se présente — sauf les identifications très douteuses de C II, C III, O II et Ca II — cela signifie que tous les autres éléments sont beaucoup moins abondants que l'hélium.

On pourra comparer les éléments moins abondants au moyen de leurs raies interdites ; celles-ci apparaissent intenses pour la même raison que les raies de fluorescence de O III et N III. On constate immédiatement que O est considérablement plus abondant que les autres éléments qui se manifestent (N, Ne, S et probablement A). On ne peut rien dire du carbone qui n'a qu'une

raie interdite faible (non observée) dans la région observable * ; il en est de même de Mg et Al ; F, Na, Si, P, Cl, K et Ca semblent d'abondance extrêmement faible puisqu'ils ne manifestent aucune de leurs raies interdites.

En résumé, une nébuleuse est surtout composée d'hydrogène ; suivant l'ordre des abondances, nous avons alors l'hélium ; puis l'oxygène beaucoup plus rare ; ensuite N, Ne et S encore moins abondants et peut-être l'argon. Bowen signale que, comparativement au soleil dont la composition chimique est relativement bien connue depuis les recherches de H. N. Russell, il y a dans les nébuleuses une tendance à favoriser les non-métaux. Si, en effet, Na, K et Ca avaient la même abondance que dans le soleil (dix fois plus grande que celle de S), leurs raies interdites se trouveraient immédiatement.



* Le carbone serait assez abondant si les identifications des raies permises de C II et C III étaient correctes.

TABLEAU I
Les raies des nébuleuses et leur identification

λ néb.	Intensité dans N G C 7027	Intensité dans N G C 6572	Atome émetteur			Remarque
			Mécanisme primaire	Fluorescence	Raies interdites	
3025	..	..		O III		
3047	..	..		O III		
3118	..	..		O III		
3133	..	..		O III		
3188	..	..	He I			
3203,1	..	..	He II			
3299	..	..		O III		
3312,1	1	..		O III		
3340,9	..	..		O III	Ne III	
3345,8	8	8			Ne V	1
3425,8	20	20			Ne V	1
3428,5	20	..		O III		
3444,1	8	..		O III		
3704	..	..	H _z , He I			
3712	..	..	H _v			
3722	..	..	H _{μ}			
3726,16	15	8			O II	
3728,91	7	4			O II	
3734	..	..	H _{λ}			
3750	3	5	H _{κ}			
3759	4	..		O III		
3771	4	8	H _{ϵ}			
3798	5	10	H _{θ}			
3820	1	..	He I			
3835,5	8	14	H _{γ}			
3840,2	..	..		
3868,74	50	70			Ne III	
3888,96	10	15	H _z , He I			
3935	..	..	? Ca II ?			
3964,8	..	2	He I			
3967,51	50	70			Ne III	
3970,08	30	40	H _{ϵ}			
4009	..	1	He I			
4026,2	1	10	HeII, HeI			
4064	1	..				
4068,62	20	6			S II	
4076,22	2	3			S II	
4097,3	2	2		N III		
4101,74	70	60	H _{δ}			
4120,6	..	1	He I			
4144	..	1	He I			
4200	1	..	He II			
4267,1	..	2	? C II ?			
4340,46	80	70	H _{γ}			

λ néb.	Intensité dans N G C 7027	Intensité dans N G C 6572	Atome émetteur			Remarque
			Mécanisme primaire	Fluorescence	Raies interdites	
4353						
4363,21	20	80			O III	
4388,0	..	2	He I			
4416	..	1	? O II ?			
4471,54	8	20	He I			
4541,4	2	..	He II			
4571,5	5	1				
4634,1	6	1		N III		
4640,9	10	2		N III		
4649,2	1	2	? C III, O II ?			2
4658,2	5	1				
4685,76	90	..	He II			
4711,4	..	..			A IV	3
4712,6	8	5	He I			
4725,5	5	4			Ne IV	4
4740,2	20	5			A IV	3
4861,32	80	60	H β			
4922,2	..	2	He I			
4958,91	80	200			O III	
5006,84	250	800			O III	
5017	1	2	He I			
5411,3	4	..	He II			
5537	..	..			? Cl III ?	5
5577	..	..			O I	
5655		1				2
5679	..	..				raie susp.
5720	..	..			? F III ?	raie dif., 5
5737	1	..				
5754,8	4	2			N II	
5775	..	..				raie susp.
5805	..	..				bande, 7
5875,7	8	20	He I			
6086	..	..			? Ca V ?	8
6102	..	..			? K IV ?	9
6180 ?	..	..		
6205 ?	..	..		
6234	..	..		
6246	..	..				raie susp.
6302	3	5				raie susp.
6313	2	..			O I	
6364	1	2			? A V ?	10
6435	..	..			O I	
6548,1	10	10			?? A V ??	11
6562,79	100	60	H α		N II	
6583,6	30	30				
6677	1	1	He I		N II	

λ néb.	Intensité dans N G C 7027	Intensité dans N G C 6572	Atome émetteur			Remarque
			Mécanisme primaire	Fluorescence	Raies interdites	
6717	He I		S II	11
6730	1	1			S II	
7009	..	..			?? AV ??
7065	2	..				12
7136	5	5			? A III ?	
7320	3	3			O II	
7330	2	2			O II	

Remarques relatives au tableau I

1. Néon V. — Les deux raies dues à Ne V ne s'observent que dans les nébuleuses où l'excitation est la plus intense ; de toutes les raies nébuleuses, ce sont elles qui manifestent le plus fortement une augmentation d'intensité lorsque l'excitation augmente. D'ailleurs si on photographie au prisme-objectif une nébuleuse dont le spectre présente les raies $\lambda\lambda$ 3426 et 3346, les diamètres des images monochromatiques de longueurs d'onde 3426 et 3346 sont plus petits que ceux des autres images. Ceci indique que ces raies sont émises dans la portion la plus centrale de l'astre, c'est-à-dire là où la température — et, par conséquent, l'ionisation — est la plus élevée. Les raies de Ne V correspondent à la plus forte ionisation observée jusqu'ici dans les nébuleuses ⁽²²⁾.
2. Raies 4649-5655. — Pourraient être dues à Krypton V (transitions interdites ; c'est là une suggestion personnelle inédite : le $\Delta\nu$ calculé est 3875 ± 50 et le $\Delta\nu$ observé 3825 cm^{-1} ; le domaine spectral est correct).
3. Argon IV. — D'après Wright, l'identification présenterait quelque doute, si on se base sur la façon dont les deux raies se comportent dans différentes nébuleuses. Toutefois, d'après une note récente de R. H. Stoy ⁽²³⁾, il semble que les objections à l'identification puissent être levées ; la raie 4740.2 pourrait être due aussi en partie à la transition aurorale de AV (?).
4. Néon IV. — Des objections avaient été faites par Edlén-Swings ⁽²⁴⁾ à cette identification due à Boyce-Menzel-Payne ⁽²⁵⁾ ; d'après une note récente ⁽²⁶⁾, il semble bien que l'attribution soit correcte.
5. Chlore III. — Identification suggérée par Stoy. — Il faudrait que l'autre composante λ 5517 (plus faible) du doublet apparaisse ; cette composante n'a pas été observée, mais ce pourrait être dû à la sous-exposition des clichés dans cette région.
6. Fluor III. — Identification suggérée par Stoy. — La raie observée est diffuse et le doublet prédit de F III est en $5722\text{-}5732 (\pm 6 \text{ \AA})$.
7. Bande 5805. — Est probablement composée de deux ou plusieurs raies.

8. Calcium V. — Identification suggérée par Stoy. L'autre composante du doublet, λ 5309, tombe dans un domaine sous-exposé ; sur une plaque plus exposée, une trace de raie apparaît dans la région de λ 5309 et, d'autre part, Campbell ⁽²⁷⁾ a observé visuellement une raie faible vers λ 5311 dans NGC 7027.
9. Potassium IV. — Suggestion de Stoy ; l'autre composante, λ 6795 tombe dans une région sous-exposée.
10. Argon V. — Suggestion de Bowen (indiquée avec un point d'interrogation dans le mémoire de Bowen).
11. Argon V. — Suggestion de Stoy (incompatible avec celle de Bowen).
12. Argon III. — Suggestion de Bowen (id. 10).



APPENDICE I

Les transitions interdites des atomes légers

Nous avons affaire à des transitions à partir d'états métastables des configurations électroniques normales. On ne doit donc retenir que les ions de configurations $1s^2 2s^2 2p^2$, $1s^2 2s^2 2p^3$, $1s^2 2s^2 2p^4$, ... $3p^2$, ... $3p^3$, ... $3p^4$, c'est-à-dire :

$$\left\{ \begin{array}{l} 2p^2 : \text{C I, N II, O III, F IV, Ne V, Na VI, Mg VII, ... ;} \\ 3p^2 : \text{Si I, P II, S III, Cl IV, A V, K VI, Ca VII, ... ;} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 2p^3 : \text{N I, O II, F III, Ne IV, Na V, Mg VI, Al VII, ... ;} \\ 3p^3 : \text{P I, S II, Cl III, A IV, K V, Ca VI, Sc VII, ... ;} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 2p^4 : \text{O I, F II, Ne III, Na IV, Mg V, Al VI, Si VII, ... ;} \\ 3p^4 : \text{S I, Cl II, A III, K IV, Ca V, Sc V, Ti VII, ...} \end{array} \right.$$

Les niveaux électroniques sont, en partant de l'état fondamental :

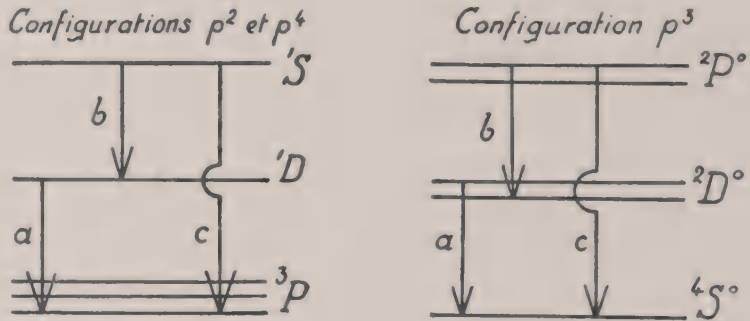
$$\begin{array}{ll} \text{Configuration } p^2 : & {}^3\text{P, } {}^1\text{D, } {}^1\text{S ;} \\ \text{» } p^3 : & {}^4\text{S}^0, {}^2\text{D}^0, {}^2\text{P}^0 ; \\ \text{» } p^4 : & {}^3\text{P, } {}^1\text{D, } {}^1\text{S.} \end{array}$$

Pour chaque configuration et d'après les règles de sélection habituelles *, les transitions entre les différents termes sont interdites puisque ceux-ci sont de même parité ; on a indiqué au § 3 dans quelles conditions ces raies apparaissent néanmoins dans les nébuleuses.

* C'est-à-dire correspondant au dipôle électrique.

Boyce, Menzel et Payne ont introduit une désignation particulière distinguant entre les trois types de passages électroniques :

$$\begin{aligned}
 \text{transition nébulaire } a & \quad \left\{ \begin{array}{l} p^2 \text{ ou } p^4 : {}^3P - {}^1D ; \\ p^3 \quad \quad : {}^4S^0 - {}^2D^0 ; \end{array} \right. \\
 \text{transition aurorale } b & \quad \left\{ \begin{array}{l} p^2 \text{ ou } p^4 : {}^1D - {}^1S ; \\ p^3 \quad \quad : {}^2D^0 - {}^2P^0 ; \end{array} \right. \\
 \text{transition transaurorale } c & \quad \left\{ \begin{array}{l} p^2 \text{ ou } p^4 : {}^3P - {}^1S ; \\ p^3 \quad \quad : {}^4S^0 - {}^2P^0 . \end{array} \right. \quad (\text{V. fig. 1})
 \end{aligned}$$



Les dénominations introduites par Boyce-Menzel-Payne proviennent de ce que, dans les nébuleuses, les passages du type *a* donnent les raies les plus intenses, alors que la transition *b* fournit l'interprétation ⁽²⁸⁾ de la raie verte intense λ 5.577, 350 de l'aurore (passage ${}^1D - {}^1S$ de O I).

Comment peut-on déterminer les longueurs d'onde de ces raies non observables en laboratoire (puisque interdites par les règles de sélection habituelles) ? Lorsque le spectre de l'atome considéré est complètement classé suivant un schéma de niveaux, il suffit pour avoir le nombre d'ondes d'une transition interdite, de faire la différence de deux termes. Mais dans beaucoup de cas, on ne connaît pas tous ces niveaux profonds et une inter- ou une extrapolation du type Moseley est nécessaire au sein d'une

séquence isoélectronique *. Comme exemple d'une telle extrapolation, prenons le cas du Ne V, identifié dans les nébuleuses, simultanément par Bowen et par Swings-Edlén.

Configuration $2p^2$

	$^3P_2 - ^1D_2$	$^3P_1 - ^1D_2$	$\Delta\nu$	$\sqrt[4]{\Delta\nu}$	$^1D_2 - ^1S_0$	$^3P_1 - ^1S_0$
G I	10150	10178	27,5	2,290	11455	21632
	5034			0,721	5916	
N II	15184	15267	82,2	3,011	17371	32638
	4780			0,718	5542	
O III	19964	20158	193,4	3,729	22913	trop u. v.
	4660			0,706	5390	
F IV	24624	25011	387	4,435	28303	id.
	[4580]			[0,702]	[5320]	
Ne V	[29204]	[29900]	[696]	[5,137]	[33623]	id.

Les nombres d'onde indiqués entre crochets sont des nombres d'onde « estimés » ; remarquons qu'il peut y avoir une imprécision assez grande sur la position du doublet $^3P - ^1D$; mais l'écartement $\Delta\nu \equiv ^3P_1 - ^3P_2$ de ces deux raies peut être déterminé avec une précision assez grande, comme on s'en rend compte en examinant la variation lente de $\sqrt[4]{\Delta\nu}$ **.

Dans le cas des longueurs d'onde ainsi estimées, comment une identification peut-elle être faite avec quelque plausibilité ? Seuls, les doublets peuvent donner des interprétations vraiment probables et il faut que les conditions suivantes soient remplies :

a) La différence ($\lambda_{\text{estimé}} - \lambda_{\text{nébul.}}$) ne peut guère dépasser les limites permises par l'inter- ou l'extrapolation ;

b) On doit avoir $\Delta\nu_{\text{estimé}} \simeq \Delta\nu_{\text{observée}}$ (avec un accord assez bon) ;

c) Le rapport des intensités des composantes du doublet doit rester constant pour toutes les nébuleuses et doit correspondre à la valeur théorique *** ;

* Ceci n'est d'ailleurs possible que dans les cas — assez rares — où les autres atomes de la séquence isoélectrique sont bien connus.

** Pratiquement, on a d'abord estimé les nombres [4580] et [0.702] ; puis $\sqrt[4]{\Delta\nu} = [5.137]$; puis enfin $\Delta\nu = [696]$.

*** Les intensités relatives ont été étudiées théoriquement par E. U. Condon ; la probabilité d'une transition interdite quelconque est la somme de

d) Aucune raie interdite des types considérés ici ne peut se présenter en absorption dans un spectre d'astre quelconque ;

e) A cause de la nécessité d'un moindre potentiel d'excitation, les transitions venant de l'état 1D (ou de $^2D^0$) doivent être plus intenses que celles qui viennent de 1S (ou de $^2P^0$).

Plusieurs identifications tout à fait sûres ont été faites en partant d'estimations du type indiqué ici, notamment celles de Néon V.



la probabilité du quadrupôle électrique et de celle du dipôle magnétique. Par souci de brièveté, ce point n'est pas développé ici.

APPENDICE II

Quelques transitions interdites d'atomes plus lourds que l'argon

Sans nous soucier des abondances astronomiques habituelles, nous avons examiné les séquences isoélectroniques de configurations $4p^2$, $4p^3$, $4p^4$; $5p^2$, $5p^3$, et $5p^4$ * ; souvent on ne peut pas obtenir de renseignements précis à cause de la pénurie en données spectroscopiques. Dans le cas, par exemple, des gaz nobles Krypton et xénon, on ne peut rien dire au sujet des raies interdites, sauf pour Kr V et Xe III où l'on possède des séquences isoélectroniques relativement bonnes :

Séquence $4p^2$: Ge I, As II, Se III, Br IV, Kr V ;

Séquence $5p^4$: Te I, I II, Xe III.

Pour Kr V, les nombres d'onde sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} {}^3P_2 - {}^1D_2 = 16.000 \pm 1.000 \text{ cm}^{-1} \\ {}^3P_1 - {}^1D_2 = 19.875 \pm 1.000 \text{ cm}^{-1} \end{array} \right\} \Delta \nu = 3.875 \pm 50 ;$$

il n'est pas impossible que Kr V puisse interpréter les deux raies non identifiées $\lambda \lambda$ 4.649 et 5.655 ; mais des précisions aussi bien astronomiques que spectroscopiques seraient encore nécessaires.

Quant à Xe III, on peut seulement dire que l'écartement des deux raies nébulaires est $\Delta \nu = {}^3P_2 - {}^3P_1 = 10.120 \pm 100 \text{ cm}^{-1}$;

* De nombreux renseignements à ce sujet nous ont été fournis par Dr B. Edlén, que nous tenons à remercier vivement.

la composante $^3P_1 - ^1D_2$ serait d'ailleurs loin dans l'infra-rouge ($\lambda \simeq 16.000 \text{ \AA}$!); provisoirement on ne peut rien dire.

On peut aussi faire une extrapolation (assez audacieuse !) pour Xe V et on trouve

$$^3P_2 - ^1D_2 \simeq 13.200 \text{ cm}^{-1}; \quad ^3P_1 - ^1D_2 \simeq 18.540 \text{ cm}^{-1}.$$



BIBLIOGRAPHIE

- (¹) HUBBLE, *Ap. J.*, 56, 162 et 400, 1922.
- (²) MENZEL, *P. A. S. Pac.*, 38, 295, 1926.
- (³) ZANSTRA, *Ap. J.*, 65, 50, 1927 ; *ZS. für Astroph.*, 2, 1, 1931.
- (⁴) AMBARZUMIAN, *Pulko. Obs. Bull.*, n° 13 ; *M. N. R. A. S.*, 93, 50, 1931.
- (⁵) CHANDRASEKHAR, *ZS. für Astroph.*, 9, 266, 1935.
- (⁶) WRIGHT, *Publ. Lick Obs.*, 13, 193, 1918.
- (⁷) BOWEN, *Ap. J.*, 67, 1, 1928.
- (⁸) BECKER-GROTRIAN, *Erg. der ex. Naturw.*, 7, 65, 1928.
- (⁹) BOWEN, *Nature*, 123, 450, 1929.
- (¹⁰) BOWEN, *Phys. Rev.*, 36, 600, 1930.
- (¹¹) PASCHEN, *Naturw.*, 18, 752, 1930.
- (¹²) BOYCE, MENZEL, PAYNE, *Proc. Nat. Acad.*, 19, 581, 1933 ; *P. A. S. P.*, 46, 213, 1934.
- (¹³) BOWEN, *P. A. S. P.*, 46, 145, 1934 ; *Phys. Rev.*, 46, 791, 1934.
- (¹⁴) EDLÉN et SWINGS, *C. R.*, 198, 1842, 1934 ; SWINGS et EDLÉN, *C. R.*, 198, 1748 et 2071, 1934.
- (¹⁵) CONDON, *Ap. J.*, 79, 217, 1934.
- (¹⁶) MERRILL, *P. A. S. P.*, 40, 254, 1928.
- (¹⁷) STÖY, *P. A. S. P.*, 46, 297 et 362, 1934.
- (¹⁸) WRIGHT, *Lick Obs. Bull.*, 17, 1, 1934 ; *P. A. S. P.*, 46, 142 et 280, 1934.
- (¹⁹) BOWEN, *P. A. S. P.*, 46, 146, 1934.
- (²⁰) BOWEN, *Ap. J.*, 81, 1, 1935.
- (²¹) ZANSTRA, *Ap. J.*, 65, 50, 1927.
- (²²) SWINGS-EDLÉN, 2^e référence 14.
- (²³) ETOY, 2^e référence 17.
- (²⁴) EDLÉN-SWINGS, 1^{re} référence 14.
- (²⁵) BOYCE, MENZEL, PAYNE, 1^{re} référence 12.
- (²⁶) BOYCE, MENZEL, PAYNE, 2^e référence 12.
- (²⁷) CAMPBELL, *Astronomy and Astrophysics*, 13, 500, 1894.

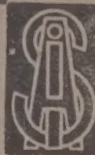
TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	5
§ 1. — Etat de la question.	6
§ 2. — L'émission des raies permises	8
§ 3. — L'émission des raies interdites	12
§ 4. — Conclusions	14
Tableau I	17
Appendice I	21
Appendice II	25
BIBLIOGRAPHIE	27



ACTUALITES SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

PUBLIÉES SOUS LA DIRECTION DE MM.



F. ENRIQUES
De l'Académie Dei Lincei
Professeur à l'Université de Rome
**PHILOSOPHIE ET HISTOIRE
DE LA PENSÉE SCIENTIFIQUE**

Ch. FABRY
Membre de l'Institut
Professeur à la Faculté des Sciences
OPTIQUE

E. FAURE-FREMIET
Professeur au Collège de France
BIOLOGIE
(Embryologie et Histogenèse)

Ch. FRAIPONT
Professeur à la Faculté des Sciences
de Liège

**PALÉONTOLOGIE
ET LES GRANDS PROBLÈMES
DE LA BIOLOGIE GÉNÉRALE**

Maurice FRECHET
Professeur à la Sorbonne
ANALYSE GÉNÉRALE

M. L. GAY
Professeur de Chimie-Physique
à la Faculté des Sciences de Montpellier
THERMODYNAMIQUE ET CHIMIE

J. HADAMARD
Membre de l'Institut
**ANALYSE MATHÉMATIQUE
ET SES APPLICATIONS**

Victor HENRI
Professeur à l'Université de Liège
PHYSIQUE MOLÉCULAIRE

A. F. JOFFE
Directeur de l'Institut Physico-Technique
de Leningrad
PHYSIQUE DES CORPS SOLIDES

A. JOUNIAUX
Professeur à l'Institut de Chimie de Lille
CHIMIE ANALYTIQUE
(Chimie-Physique, minérale
et industrielle)

P. LANGEVIN
Membre de l'Institut
Professeur au Collège de France

**I. — RELATIVITÉ
II. — PHYSIQUE GÉNÉRALE**

Louis LAPICQUE
Membre de l'Institut
Professeur à la Sorbonne
**PHYSIOLOGIE GÉNÉRALE
DU SYSTÈME NERVEUX**

A. MAGNAN
Professeur au Collège de France
**MORPHOLOGIE
DYNAMIQUE
ET MÉCANIQUE DU MOUVEMENT**

Ch. MARIE
Directeur de Laboratoire
à l'Ecole des Hautes-Etudes
ÉLECTROCHIMIE APPLIQUÉE

Ch. MAURAIN
Membre de l'Institut
Doyen de la Faculté des Sciences
Directeur de l'Institut de Physique du Globe
PHYSIQUE DU GLOBE

André MAYER
Professeur au Collège de France
PHYSIOLOGIE

Henri MINEUR
Astronome à l'Observatoire de Paris
Maître de Recherches
ASTRONOMIE STELLAIRE

Chr. MUSCELEANU
Professeur à la Faculté des Sciences
de Bucarest
PHYSIQUE GÉNÉRALE ET QUANTA

M. NICLOUX
Professeur à la Faculté de Médecine
de Strasbourg

CHIMIE ANALYTIQUE
(Chimie organique et biologique)

P. PASCAL
Correspondant de l'Institut
Professeur à la Sorbonne et à l'Ecole
Centrale des Arts et Manufactures
CHIMIE GÉNÉRALE et MINÉRALE

Ch. PEREZ
Professeur à la Sorbonne
BIOLOGIE ZOOLOGIQUE

J. PERRIN
Membre de l'Institut
Prix Nobel de Physique
Professeur à la Faculté des Sciences
de Paris
ATOMISTIQUE

CATALOGUE SPÉCIAL SUR DEMANDE



ACTUALITES SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

PUBLIÉES SOUS LA DIRECTION DE MM.

Marcel PRENANT
Professeur à la Sorbonne

I. — BIOLOGIE ÉCOLOGIQUE II. — LEÇONS DE ZOOLOGIE

A. REY
Professeur à la Sorbonne
HISTOIRE DES SCIENCES

Y. ROCARD
Maître de Recherches
THÉORIES MÉCANIQUES
(Hydrodynamique-Acoustique)

R. SOUEGES
Ch^e de Travaux
à la Faculté de Pharmacie
EMBRYOLOGIE
ET MORPHOLOGIE VÉGÉTALES

TAKAGI
Professeur à l'Université Impériale de Tokyo
MATHÉMATIQUES GÉNÉRALES

TAMIYA (HIROSHI)
Membre du Tokugawa Biologischen
Institut-Tokio
BIOLOGIE (Physiologie cellulaire)

A. TCHITCHIBABINE
Membre de l'Académie des Sciences
de l'U. R. S. S.

CHIMIE ORGANIQUE
(Série hétérocyclique)

Georges TEISSIER
Sous-directeur de la Station
Biologique de Roscoff

BIOMÉTRIE ET STATISTIQUE BIOLOGIQUE

G. URBAIN
Membre de l'Institut
Professeur à la Faculté des Sciences
de Paris

THÉORIES CHIMIQUES

Pierre URBAIN
Maître de Conférences à l'Institut
d'Hydrologie et de Climatologie
de Paris

GÉOCHIMIE

L. VERLAINE
Professeur à l'Université
de Liège

PSYCHOLOGIE ANIMALE

P. WEISS
Membre de l'Institut
Directeur de l'Institut de Physique
de l'Université de Strasbourg

MAGNÉTISME

A. WURMSER
Directeur du Laboratoire
de Biophysique
de l'Ecole des Hautes-Etudes

BIOPHYSIQUE

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

Moment électrique et structure moléculaire	15 »
222. Y. ROCARD. Propagation et absorption du son	15 »
223. Jean-Louis DESTOUCHES. Le rôle des espaces abstraits en physique nouvelle	18 »
224. Julien PACOTTE. La logique et l'empirisme intégral	12 »
225. Henri MINEUR. Dénombrements d'étoiles, Catalogue d'étoiles, Comparai- son des séquences photométriques	15 »
226. Hans HAHN. Logique, Mathématiques et connaissance de la réalité	10 »
227. René FABRE. Altérations du sang dans les intoxications professionnelles	12 »
228. Daniel BRARD. Toxicologie du chrome	15 »
229. J. VON NEUMANN. Charakterisierung des Spektrums eines Integraloperators	7 »
230. P. M. S. BLACKETT. La radiation cosmique, aperçu général	10 »
231. P. M. S. BLACKETT. La radiation cosmique, la méthode de la chambre de C. T. R. Wilson	8 »
232. P. M. S. BLACKETT. La radiation cosmique, l'action du champ magné- tique terrestre	7 »
233. P. M. S. BLACKETT. La radiation cosmique, la perte d'énergie par ionisa- tion	10 »
234. Y. BOCARD. La Stabilité de Route des Locomotives (première partie)	15 »
235. René FABRE. Introduction à l'Etude de la Toxicologie. Généralités sur les Poisons	15 »
236. Pierre FLEURY. Généralités sur les Mesures. Préparation, Exécution, Interprétation, Calculs, Unités, Législation	15 »
237. René FABRE. Toxicologie des Gaz (première partie)	12 »
238. Edgar LEDERER. Les Caroténoïdes des Animaux	15 »
239. Théophile CAHN. Biochimie du Jeûne	12 »
240. Boris EPHRUSSI. Phénomènes d'Intégration dans les cultures des Tissus	8 »